

Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой FASTSNAP

■ Шарлов М.В.¹, Буддо И.В.^{1,2}, Мисюркеева Н.В.¹, Шелохов И.А.¹, Агафонов Ю.А.¹

¹ АО "Иркутское электроразведочное предприятие", г. Иркутск,

² Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

Введение

Метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) применяется достаточно широко как для изучения ВЧР [1, 2, 3, 4, 5], так и при поисках и разведке месторождений нефти и газа [6, 7, 8]. Революционное развитие микроэлектроники на рубеже 2000-х годов сделало доступным применение скоростных прецизионных АЦП, позволив осуществлять измерение сигнала в наносекундном интервале времен, что существенно повысило детальность исследований ЗСБ для верхней части разреза. Применение современных достижений в аппаратуре и программном обеспечении позволило по-новому взглянуть на возможности индуктивной электроразведки. Проведенные в последние годы крупномасштабные исследования методом малоглубинных ЗСБ (мЗСБ) по высокоплотным сетям наблюдения (до 33 ф.т./км²) наглядно демонстрируют эффективность метода при решении геологических задач в широком диапазоне глубин от 15 до 500–600 м.

Методика работ методом мЗСБ

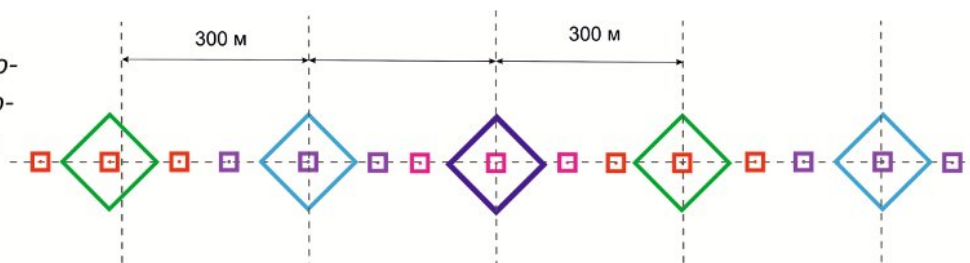
ЗСБ имеет давние традиции применения в России при решении широкого круга геологических задач: от изучения верхней части разреза до поисков и

разведки месторождений углеводородов. Большой вклад в разработку теории метода, методики работ и обработки результатов ЗСБ был внесен учеными А.Н.Тихоновым, Л.Л.Ваньяном, С.А.Шейнманном, Б.И.Рабиновичем и др., а также G.V.Keller, J.R. Wait, L. Buselli, C.H. Stoyer и др.

Этот метод относится к группе методов импульсной индуктивной электроразведки с искусственными источниками электромагнитных полей. Среди различных вариантов источников и приемников электромагнитного поля наиболее распространены установки типа «петля – петля», либо «петля в петле».

Это объясняется высокой технологичностью подобного рода установок, не требующих устройства заземлений, что позволяет проводить исследования в любое время года. Установка с индуктивным возбуждением бывает двух видов: с вынесенной за пределы генераторной приемной петлей (Q-q) и соосными приемно-генераторными петлями, т.н. установка «петля в петле» (Qq). Обычно на практике рекомендуется использовать комбинированную соосно-разнесенную установку, когда от одной генераторной петли измеряется сигнал на соосной и разнесенных приемных петлях (Рис. 1.).

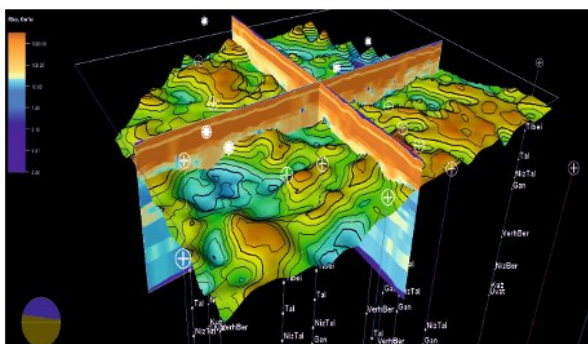
► Рис. 1. Пример профильного расположения установок мЗСБ.



Метод ЗСБ может применяться для решения различных геологических задач, в основе которых лежит дифференциация слагающих разрез горных пород по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). Сопротивление пород изменяется в широких пределах. Одна и та же порода, особенно осадочного происхождения, может иметь различное удельное сопротивление в зависимости от ее состояния и условий залегания, внутренней структуры, температуры и др.

Для работ методом мЗСБ используют два основных типа сетей наблюдений: площадные и профильные. Профильные сети наблюдений в основном используются, когда отсутствует сеть сейсмических профилей или в условиях работы в урбанизированных районах. Площадные сети используются для решения задач детального картирования верхней части разреза. Такие сети проектируются по заранее имеющейся сети сейсмических профилей. Плотность съемки может достигать 16–33 ф.т./км².

Использование площадных высокоплотных сетей наблюдений делает возможным представление данных в формате SEG-Y, что позволяет интерпретировать электро- и сейсморазведку в единых интерпретационных системах, таких как Petrel (Shlumberger) (Рис. 2.)



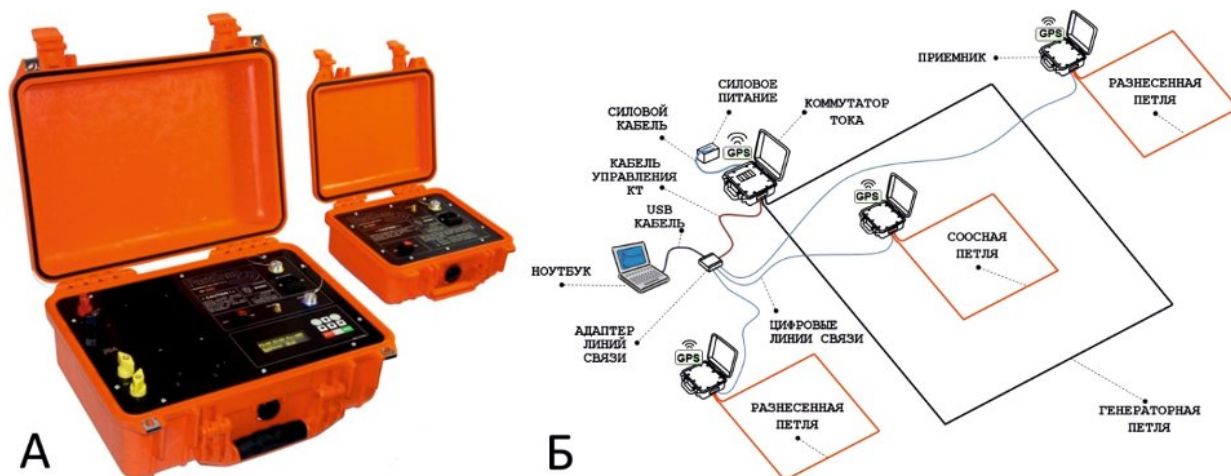
▲ Рис. 2. Пример интерпретации данных мЗСБ в программном пакете Petrel (Shlumberger).

Цифровая малоглубинная телеметрическая станция FastSnap

Первая версия электроразведочной станции FastSnap была разработана в 2005 г. коллективом специалистов (Стефаненко С.М., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В.). Аппаратурные решения, заложенные в основу FastSnap, позволили получить качественно новый уровень малоглубинной индуктивной электроразведки [9]. Существующие на тот момент разработки, по мнению авторов, по параметрам не в полной мере соответствовали задачам малоглубинных исследований. Технические решения, заложенные в первой версии станции FastSnap (высокочастотный измерительный тракт, цифровая регистрация с арифметическим шагом дискретизации, телеметрический многоканальный сбор данных, возможность работы с заземленной линией и т.д.), позволили с успехом применять ее для выполнения малоглубинных исследований, а также позволили вносить актуальные улучшения в аппаратную и программную части комплекса.

На сегодняшний момент разработано третье поколение станции FastSnap [10]. Основные блоки станции (измерители, коммутатор тока) изготавливаются в пластиковых ударопрочных корпусах Pelicase и имеют небольшие габариты и вес (Рис. 3А). Это дает возможность проводить полевые работы в пешеходном варианте в условиях пересеченного рельефа и сложной проходимости местности.

Схема подключения станции (в трехканальном варианте) приведена на Рис. 3Б. Измерители располагаются непосредственно у датчиков (приемных петель или линий). Сигнал с датчика оцифровывается измерителем и далее передается в компьютер уже в цифровой помехозащищенной форме.



▲ Рис. 3. Станция Fast Snap: А – Коммутатор тока (слева) и телеметрический измеритель (справа); Б – Схема подключения станции FastSnap в трехканальном режиме.

Измерители и коммутатор тока подключаются к компьютеру через адаптер линий связи (АЛС), длина линий связи при этом может достигать 400 м. Синхро-

низация работы коммутатора и измерителей осуществляется на основе системы GPS, либо по проводам. Коммутатор тока управляется со встроенного пульта

▼ Табл. 1. Параметры станции FastSnap.

Измеритель, коммутатор тока FastSnap	
Корпусы приборов, подключение кабелей	Пластиковые ударопрочные влагозащищенные корпуса Pelicase. Приборы могут работать с закрытой крышкой, все рабочие разъемы расположены на боковых панелях.
Количество каналов	1 – 4 канала одновременно
Динамический диапазон, шаг дискретизации и разрядность	- «Высокочастотный» АЦП ($\pm 1В$): ΔT 25 (14-bit), 100 (16-bit), 800 (19-bit) нс, 6.4 (22-bit) мкс; - «Низкочастотный» АЦП ($\pm 4В$, 24-bit): ΔT 25.6, 204.8 мкс.
Коэффициент усиления	Набор коэффициентов усиления в диапазоне 1 – 280.
GPS	Встроенная антенна, разъем подключения внешней антенны.
Точность синхронизации	GPS (± 90 нс) или проводная (± 300 нс).
Диапазон регистрации	До 14500 отсчетов с выбранным шагом дискретизации (25 нс - 3 с).
Измеряемые параметры	Напряжение внутренней батареи, координаты местоположения, коэффициент усиления канала, ток в источнике, сигнал, оцифрованный с заданным шагом дискретизации с датчика (петли или линии).
Выходной ток и напряжение	- ток 0.1 – 30 А на нагрузку сопротивлением до 2 Ом (петля); - напряжение до 330 В при макс. токе 1 А (заземленная линия).
Режимы тока	Режимы тока 0.5, 2, 5, 12, 30 А (ток не стабилизируется, величина измеряется с погрешностью не более 1%).
Параллельный шунт	Набор из 28 значений параллельного шунтирующего резистора (Выкл., 50 – 2000 Ом) автоматически коммутируемого для подавления «звона» генераторной петли.
Периоды и скважность	Периоды 20, 40, 100, 200, 500, 1000 мс; Соотношение длительности тока к паузе: 1:1, 3:1, без паузы.
Время выключения тока («фронт») 1 А	0.6 мкс на активной нагрузке, 1 – 2 мкс для ГП 25 × 25 м, 3.5 – 5 мкс для ГП 100 × 100 м.

управления или автоматически из программы регистрации, запущенной на полевом компьютере. Блоки станции оснащены встроенными приемниками GPS, обеспечивающими определение координат и высот точек наблюдения.

Основные технические параметры станции FastSnap приведены в Табл. 1.

Станция FastSnap обладает рядом технических особенностей, отличающих ее от аналогичных разработок:

- Скоростной измерительный тракт на базе АЦП с частотой дискретизации 40 МГц позволяет регистрировать ранние времена переходных процессов с высоким разрешением, обеспечивая при этом большую чувствительность на поздних временах благодаря 24-битному АЦП с частотой дискретизации 40 кГц.

- Измерение и сохранение исходных данных с арифметическим шагом дискретизации по времени позволяют выполнять адаптивную цифровую постобработку сигналов и достигать максимального соотношения сигнал/шум на всем временном диапазоне измерений [11].

- Одновременная работа до 4 каналов позволяет использовать более технологичные и производительные пространственно-разнесенные установки, либо организовать многокомпонентные измерения.

- Коммутатор тока с силой тока до 30 А обеспечивает уверенное измерение сигналов на поздних временах, позволяя достичь глубинности исследований до 500 – 600 м с генераторной петлей 100 × 100 м (в условиях Восточной Сибири).

- Быстрое выключение тока и работа с малыми периодами следования импульсов тока, вместе с высокочастотным измерительным трактом, позволяют обеспечить высококачественные измерения с малыми размерами установок

(например, организовать работы по методике ЭМС – электромагнитного сканирования).

- Программный комплекс станции FastSnap обеспечивает полный цикл электроразведочных работ – от планирования сетей наблюдения, измерения и обработки сигналов, до интерпретации, визуализации и геологического истолкования. Все программы объединены в рамках единой среды, имеют унифицированный графический интерфейс.

Измерение и обработка сигналов ЗСБ в программном комплексе станции FastSnap

Управление работой станции осуществляется с помощью программы FastEM. Измерители регистрируют и передают на компьютер сигнал с арифметическим шагом дискретизации (25, 100, 800 нс; 6.4, 25.6, 204.8 мкс). Для усиления слабых сигналов может применяться встроенный малошумящий усилитель с коэффициентами усиления от 1 до 280. Перед регистрацией сигнала программа передает в измерители и коммутатор требуемые параметры (дискретизация, усиление, период токовых импульсов, величина тока, шунт и т.п.). Результат установки параметров тестируется на соответствие задаваемым параметрам и только после этого становится возможной регистрация сигналов. Для повышения качества и точности измерений в измерители встроен цифро-аналоговый преобразователь с помощью которого осуществляется измерение заданного коэффициента усиления. Таким образом, при каждой передаче нового коэффициента усиления в измеритель производится его измерение и фиксация в БД. Точность измерения коэффициента усиления составляет 0.3%. Программа FastEM позволяет выполнять измерения как в

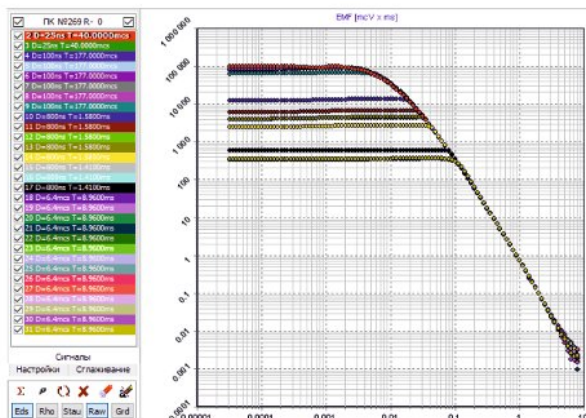
▲ Табл. 2. Параметры регистрации сигналов становления по стадиям.

Стадия становления	Дискретизация	Усиление	Ток в петле	Длина записи, мс
Ранняя стадия	25 нс, 100 нс	1-14	0.5 – 1.5 А	0.2
Средняя стадия	800 нс	14-54	2.5 – 5 А	1.6
Поздняя стадия	800 нс, 6.4 мкс	54-280	20 – 30 А	До 10 и более

ручном режиме с полным контролем всех параметров, так и в автоматическом режиме по заранее выбранному «пресету» (набору параметров регистрации).

Особенностью регистрации сигналов становления является большой динамический диапазон сигнала. Так, на ранних временах сигнал может достигать амплитуды в несколько вольт, тогда как на поздней стадии становления сигнал составляет доли микровольта. Поэтому измерение такого сигнала выполняется поэтапно (Табл. 2.). Итоговая кривая получается в результате осреднения записей по всем стадиям. Регистрация всех стадий производится со значительным перекрытием по времени для более качественной сшивки.

Для каждой из стадий процесса становления производится накопление нескольких (4 – 10) временных серий (записей) сигнала (Рис. 4.).

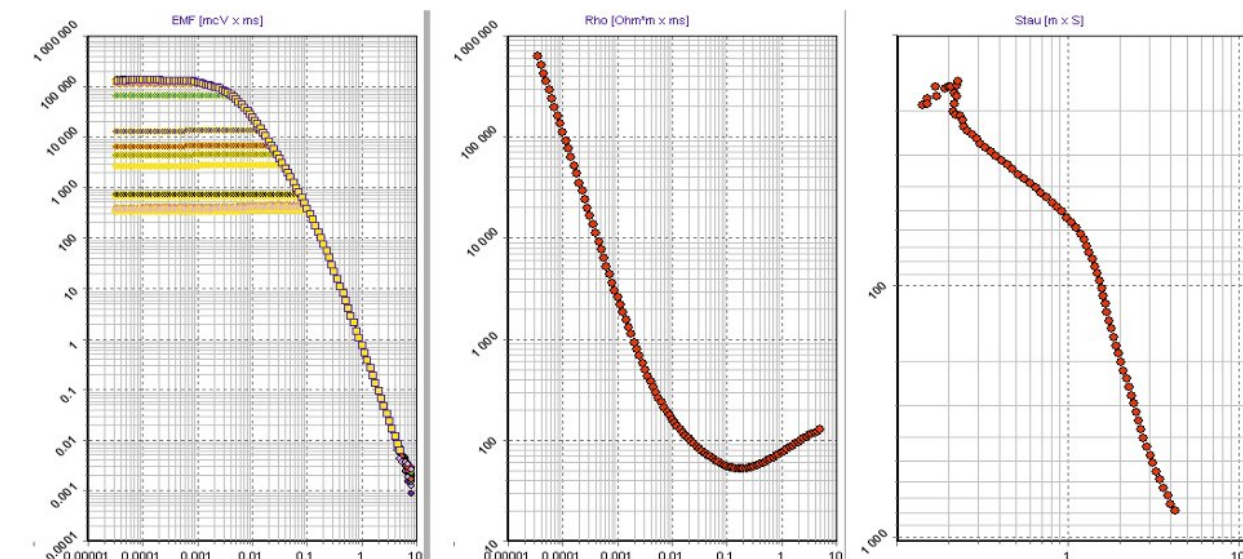


▲ Рис. 4. Стандартное накопление (stacking) сигнала из 30 записей (записи в различных режимах отображаются разным цветом) в окне итоговой обработки кривой программы TEM-Processing.

Каждая запись сигнала состоит из 100 – 200 разнополярных импульсов, сохраненных с арифметическим шагом дискретизации. Контроль качества данных осуществляется в процессе измерений с расчетом статистических показателей. Таким образом, оператор прямо на точке контролирует качество записанного материала по результату экспрессной обработки. В случае высокого уровня помех (большой дисперсии кривой) оператор может принять решение о продолжении записи и произвести накопление дополнительных записей для улучшения соотношения сигнал/шум.

Обработка измеренных сигналов выполняется в программе TEM-Processing. Итоговая кривая получается в результате суммирования всех записей с применением различных алгоритмов цифровой обработки сигналов. Как правило, на точке накапливается до 3000 импульсов с разными настройками аппаратуры, что составляет значительную статистику и позволяет получить итоговую кривую высокого качества (Рис. 5.).

При обработке могут применяться автоматические алгоритмы определения параметров помехи, выполняться частотная фильтрация и другие процедуры цифровой обработки. Фактические настройки «графа обработки» сохраняются вместе с результирующей кривой для последующего учета в ходе инверсии (для компенсации искажений сигнала процедурами обработки и улучшения достоверности интерпретации).



▲ Рис. 5. Итоговая кривая ЗСБ в трансформациях ЭДС(t), $\rho(t)$, $St(Ht)$ (слева – направо), полученная в результате обработки накопления из 30 записей (соосная установка ГП 100×100 м, ПП 10×10 м).

Методика интерпретации данных мЗСБ

Интерпретация данных мЗСБ состоит из трех основных этапов:

1. Экспресс-интерпретация.
2. Инверсия данных.
3. Геологическая интерпретация.

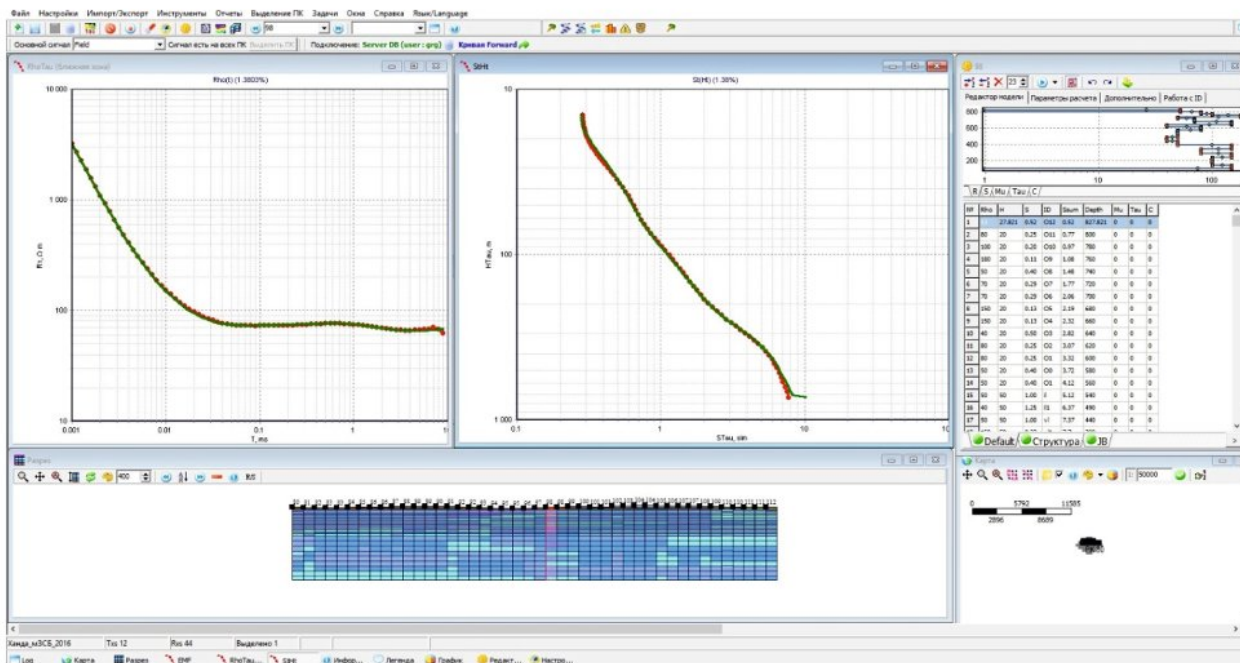
Экспресс-интерпретация представляет собой расчет кажущихся параметров dS , карт интервальной проводимости с целью определения положения основных осей проводимости.

Данный этап применяется для оперативной оценки геоэлектрических особенностей разреза (например, в ходе полевых работ).

Следующий этап – инверсия кривых ЗСБ. Инверсия заключается в численном моделировании (решении обратной задачи электроразведки) горизонтально-слоистой среды, параметры которой увязываются с данными ГИС, бурения. С целью минимизации влияния принципа эквивалентности количественная интерпретация материалов ЗСБ проводится в несколько шагов, каждый из которых вносит свой вклад в качество получаемого результата.

Первым шагом интерпретации электроразведочных данных является сбор априорной геолого-геофизической информации. На этом шаге анализируется информация по скважинам глубокого бурения, расположенным на исследуемой площади, изучаются данные ГИС скважин, определяются региональные проводящие и высокоомные маркерные горизонты, осуществляется литолого-стратиграфическая привязка слоев. По сети скважин определяется выдержанность по мощности и простираию опорных горизонтов. Изучаются проявления магматизма и тектонической активности, оказавшие влияние на строение изучаемой территории, характер электромагнитного поля. Определяется гидрогеологическая характеристика района работ.

На втором шаге осуществляется построение структурных карт по опорным горизонтам, определяется положение известных геологических структур и разрывных нарушений. Также осуществляется оценка распределения электрических характеристик разреза участка работ, осуществляется подбор структуры



▲ Рис. 6. Интерфейс программы Model 3.

первоначальной геоэлектрической модели в соответствии с построенными структурными картами.

Третий шаг включает в себя инверсию сигналов становления и построение геоэлектрических разрезов. На этом шаге геоэлектрические параметры разреза определяются с использованием программы интерпретации Model 3[12].

Программа Model 3 предоставляет возможности математического моделирования электромагнитных откликов, а также количественной интерпретации (инверсии) результатов нестационарных электромагнитных зондирований. Программа создана на основе алгоритмов расчета прямых и обратных задач, разработанных в Институте геофизики СО РАН (Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Могилатов В.С.), а также авторской модификации прямой задачи, реализованной А.Е. Каминским. Среди особенностей можно выделить интегрированное использование высокоточных математических алгоритмов и эффективную систему представления данных в площадном и профильном виде (карт и разрезов), геоэлектрических

моделей и кривых зондирования в различных трансформациях.

После инверсии происходит геологическое истолкование результатов и создание детальной физико-геологической модели ВЧР.

Поиски подземных вод в Восточной Сибири

В настоящее время на территории Иркутской области и Республики Саха (Якутия) вводятся и уже введены в эксплуатацию более пятидесяти месторождений нефти и газа. Зачастую наличие ресурса технической воды для разработки месторождения (бурение, система поддержания пластового давления и проч.) обеспечить достаточно сложно. В случае невозможности организации поверхностного водозабора или его недостаточной производительности необходима информация о глубинах залегания и латеральном распространении водоносных горизонтов. Нередко водоносы залегают на глубинах до 300 – 500 м, что делает их изучение методами электроразведки на постоянном токе практически невозмож-

ным. При этом, изучение водоносных горизонтов методами электромагнитных зондирований выглядит весьма привлекательным, т.к. обводненный горизонт характеризуется намного меньшим удельным электрическим сопротивлением, нежели вмещающие отложения. Решение задачи картирования аномалий продольной проводимости перспективных интервалов разреза возможно методом мЗСБ.

Для подтверждения данного тезиса проведено математическое моделирование сигналов ЗСБ для двух принципиально разных геоэлектрических моделей:

1. Участок расположен в пределах Ангара-Ленской ступени. ВЧР сложена породами ордовика (криволуцкая, бадарановская, ийская свиты; отложения верхней и нижней подсвит устькутской свиты) и кембрия (илгинская и верхоленская свиты). Отложения четвертичной системы имеют ограниченное распространение и малую мощность, приурочены к долинам рек, поэтому в рамках геоэлектрической характеристики изученной площади отождествляются с отложениями ордовикской системы. Водоносные горизонты залегают в широком диапазоне глубин, однако наиболее интенсивные притоки пресных вод приурочены к нижней части устькутской свиты ордовика.

2. Участок находится в пределах Непско-Ботубинской антеклизы. ВЧР сложена отложениями четвертичного периода, юры и кембрия. Основные перспективы поиска пресных вод связаны с таликовыми зонами в терригенных породах юры и верхнего кембрия.

Необходимо отметить, что в первом случае терригенно-карбонатные породы устькутской свиты ордовика характеризуются довольно высоким УЭС. Если принять коэффициент пористости 15% и

общую минерализацию пластовых вод менее 1 г/л, то при $T=5^{\circ}\text{C}$, используя известную эмпирическую зависимость Дахнова-Арчи, УЭС водонасыщенных терригенно-карбонатных пород составит $\rho_{\text{в}} \approx 416 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (Табл. 3А).

В свою очередь, в соответствии с исследованиями (Стогний, 2003), УЭС талых пород юрского возраста составляет порядка 50 Ом·м (Табл. 3Б). Таким образом, математическое моделирование сигналов ЗСБ проведено для принципиально различных геоэлектрических условий.

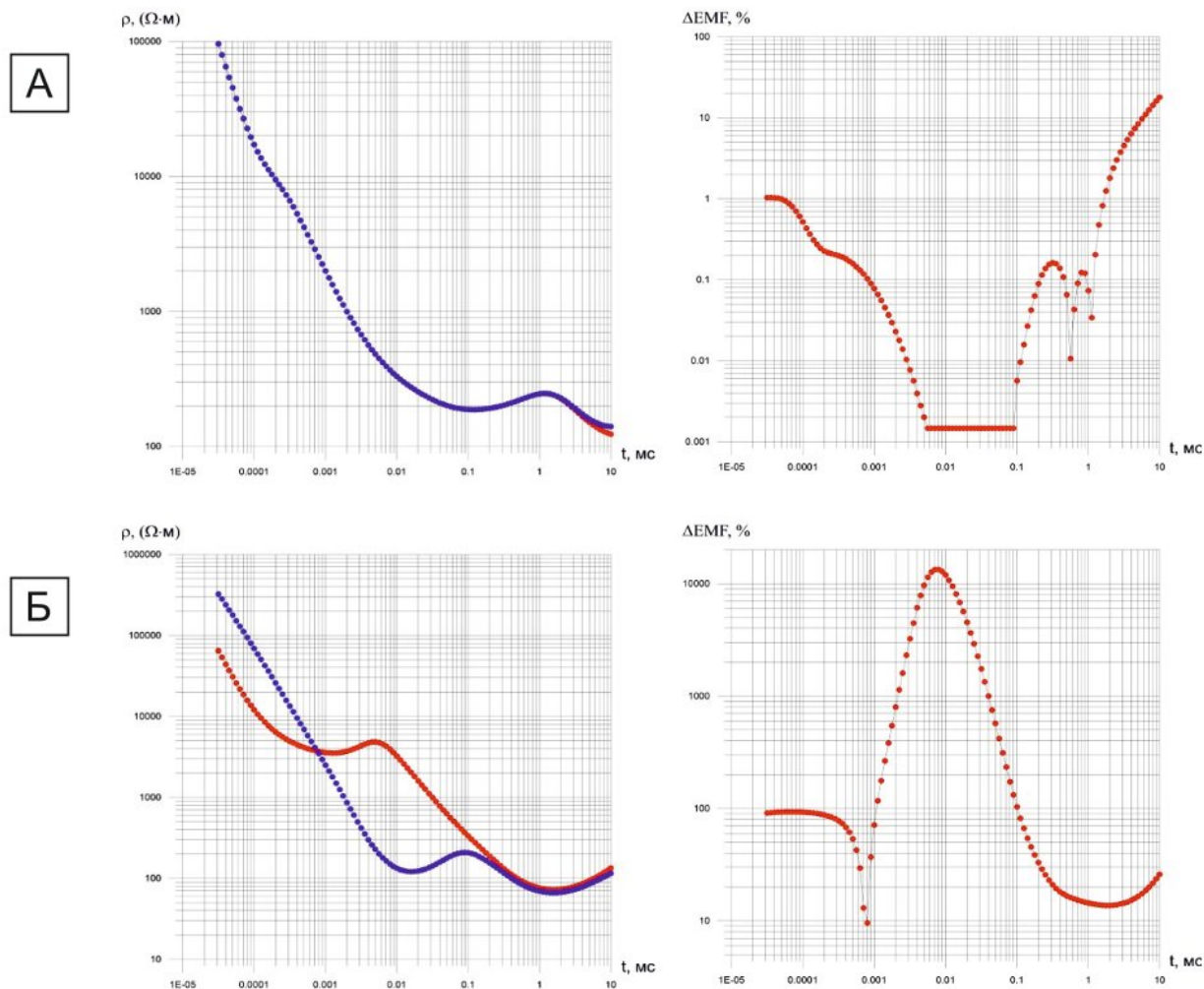
▼ Табл. 3. Геоэлектрические модели.

А) Ангара-Ленская ступень			Коллектор	Неколлектор
№	Слой	H, м	ρ , Ом·м	ρ , Ом·м
1	kr1	15	1650	1650
2	bd	100	150	150
3	is	100	300	300
4	uk2	200	300	300
5	uk1	40	416	800
6	il	100	150	150
7	vl	350	50	50

Б) Непско-Ботубинская антеклиза			Коллектор	Неколлектор
№	Слой	H, м	ρ , Ом·м	ρ , Ом·м
1	J	4	3000	3000
2	J/brd	15	50	3000
3	brd	94	3000	3000
4	mt	125	29	29
5	ich	123	500	500

Результаты математического моделирования сигналов мЗСБ представлены на Рис. 7.

Как видно из Рис. 7А, для сценария картирования водонасыщенного коллектора в отложениях устькутской свиты ордовика аномалия ЭДС (чувствительность кривой ЗСБ) достигает 20 %, тогда как для более благоприятного случая



▲ Рис. 7. Результаты математического моделирования сигналов мЗСБ при картировании водонасыщенного коллектора в ВЧР: А – для условий Ангара-Ленской ступени; Б – для условий Непско-Ботубинской антеклизы.

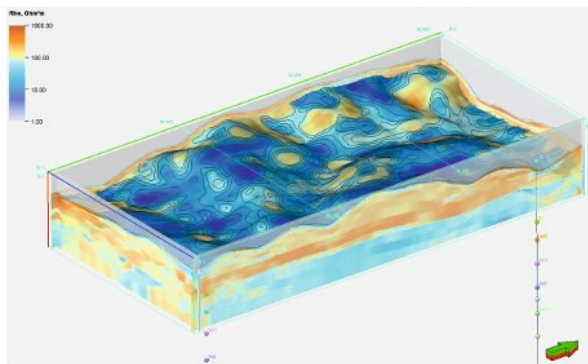
коллектор в юрских отложениях выделяется весьма контрастно (Рис. 7Б) – аномальный эффект составляет тысячи процентов. Таким образом, по результатам математического моделирования подтверждается принципиальная возможность картирования водоносных горизонтов в ВЧР методом мЗСБ в различных геологических ситуациях.

В верхней части разреза, характерного для участков Ангара-Ленской ступени, выделяются до семи водоносных горизонтов. Разрешающая способность малоглубинных ЗСБ позволяет надежно их картировать как по глубине, так и по латерали. Огромное преимущество высокоплотных площадных систем

наблюдений состоит в высокой детальности исследований, что позволяет строить куб удельного электрического сопротивления пород (Рис. 8), на основе которого закладывать гидроскважины в зонах максимальной водообильности.

По результатам полномасштабных полевых исследований мЗСБ по высокоплотным сетям наблюдения были оконтурены зоны распространения водонасыщенного коллектора в условиях Ангара-Ленской ступени (Рис. 9) и Непско-Ботубинской антеклизы (Рис. 10).

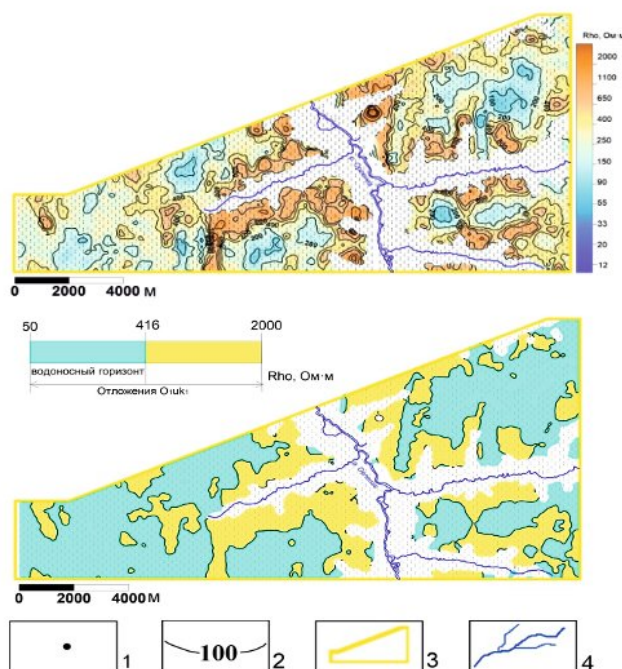
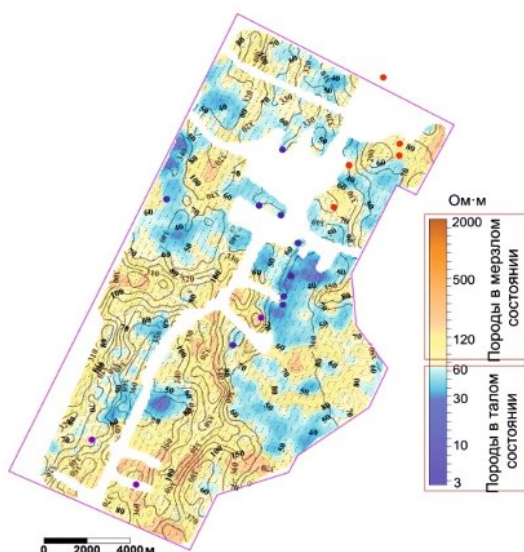
Таким образом, результаты математического моделирования, а также полномасштабных полевых работ показывают высокую чувствительность сигналов мЗСБ



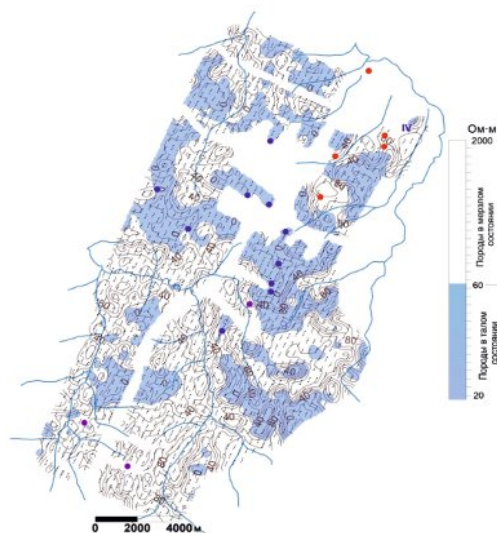
▲ Рис. 8. Куб удельного электрического сопротивления ВЧР (Ангаро-Ленская ступень).

к водонасыщенным горизонтам-коллекторам в широком диапазоне глубин от 10 до 500 м. Причем возможно картирование практически пресных вод в различных геологических сценариях: как карбонатно-терригенных породах ордовика, так и терригенных отложениях юрского времени.

Необходимо отметить, что прогноз наличия водоносных горизонтов был подтвержден последующим бурением более чем десяти гидроскважин.



▲ Рис. 9. Результаты мЗСБ (Ангаро-Ленская ступень): А - Карта продольного сопротивления отложений нижней части устькутской свиты; Б - Прогнозная карта развития водоносного горизонта в отложениях нижней подсвиты устькутской свиты ордовика. Условные обозначения: 1- пункты ЗСБ; 2 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м; 3 – контур участка работ; 4 – гидросеть.



▲ Рис. 10. Результаты площадных мЗСБ на Непско-Ботуобинской антеклизе: А - Карта продольного сопротивления юры и верхнего кембрия; Б – прогнозная карта распространения водонасыщенного коллектора в отложениях юры и верхнего кембрия[13]. Условные обозначения: 1 – пункты ЗСБ; 2 – гидросеть; 3 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м; 4 – скважины сухие; 5 – скважины с притоками воды; 6 – скважины разведочные.)

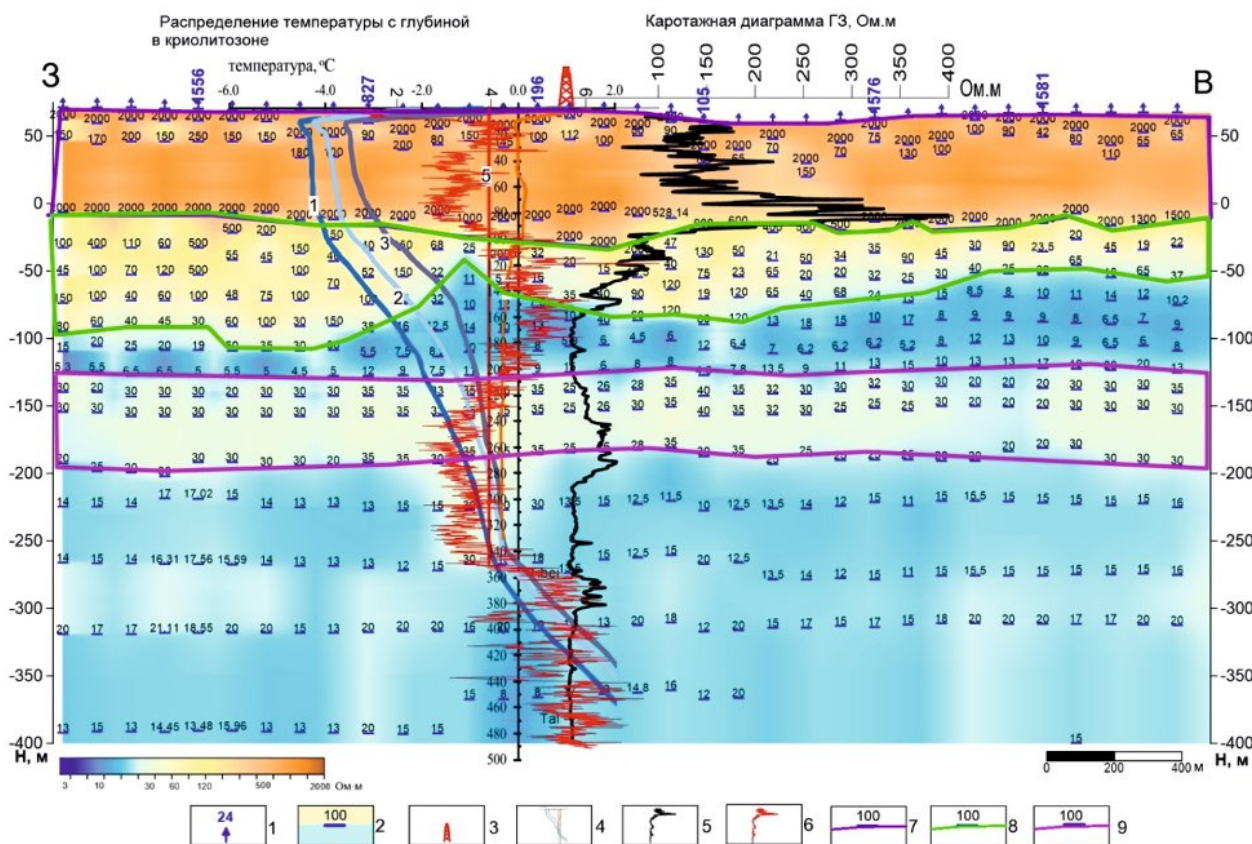
Картирование зон развития многолетнемерзлых пород

Большая часть месторождений нефти и газа Западной Сибири располагается в зоне повсеместного развития многолетнемерзлых пород (ММП). Изучение криолитозоны имеет большое значение не только при проведении геологоразведочных работ, нацеленных на поиски нефти и газа, но и для проектирования объектов инфраструктуры, нефтепромыслов и др. объектов строительства.

В качестве примера успешного изучения ММП методом мЗСБ можно привести

геоэлектрический разрез, полученный по данным исследований, проведенных на одной из площадей в Ямало-Ненецком АО. Отмечается высокая дифференцированность верхней части разреза до абсолютной глубины около 400 – 450 м (Рис. 11). Верхнюю часть разреза здесь составляют породы палеогеновой и четвертичной систем.

Высокоомный горизонт (от 100 до 2000 Ом·м), выделенный в верхней части разреза, ассоциируется с областью развития многолетнемерзлых пород в отложениях четвертичного возраста, представ-



▲ Рис. 11. Фрагмент геоэлектрического разреза мЗСБ[14].

Условные обозначения: 1 – пункты мЗСБ; 2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивления, Ом·м; 3 – скважины глубокого бурения; 4 – распределение температуры с глубиной в криолитозоне (1 – полигональный торфяник с площадным распространением ПЖЛ, 2 – полигональный торфяник с локальным распространением ПЖЛ, 3 – низкий кочковато-мочажинный торфяник, 4 – березовое редколесье, 5 – температура начала замерзания диатомита); 6 – каротажная диаграмма сопротивления (БКЗ), Ом·м; 7 – первый слой многолетнемерзлых пород в отложениях четвертичной системы (современные ММП); 8 – второй слой многолетнемерзлых пород в отложениях четвертичной системы (современные ММП); 9 – область распространения реликтовых ММП.

ленных озерно-аллювиальными, аллювиально-морскими и ледниково-морскими отложениями. Мощный слой пород до глубины около 180 м представляет собой толщу современных многолетнемерзлых пород, разделяющуюся на два горизонта по данным мЗСБ.

Ниже отмечается слой, характеризующийся сопротивлением около 25 – 40 Ом·м и отождествляемый с распространением реликтовой мерзлоты, где породы находятся в морозном состоянии, без включений льда. Далее вниз по разрезу залегают эоценовые опоковидные глины люлинворской свиты с УЭС порядка 10 – 15 Ом·м.

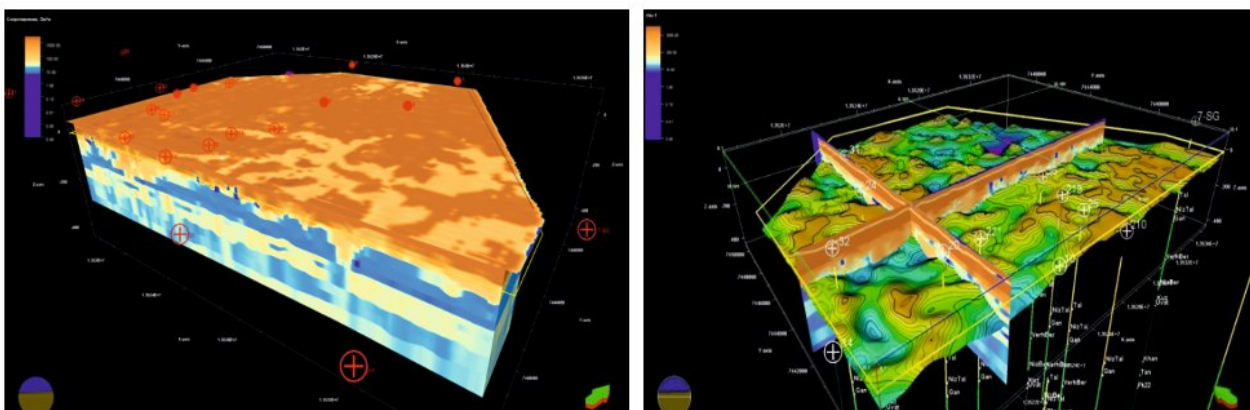
Отложения люлинворской свиты подстилают породы регионально выдержанной песчанистой толщи верхней части тибейсалинской свиты. Отложения тибейсалинской свиты характеризуются сопротивлением от 15 до 30 Ом·м. Данный горизонт также можно отнести к реликтовым многолетнемерзлым породам, находящимся в морозном состоянии.

По результатам проведенных исследований мЗСБ построен куб удельного электрического сопротивления ВЧР участка исследований (Рис. 12А), а также изучен рельеф подошвы современного слоя ММП (Рис. 12Б).

Проведенные исследования мЗСБ позволили:

1. Детально изучить ВЧР в диапазоне глубин, недоступных для глубинной сейсморазведки (до 500 м);
2. Выявить двухслойное строение толщи многолетнемерзлых пород;
3. Определить глубину залегания границы криолитозоны – по подошве отложений тибейсалинской свиты;
4. Выявить закономерность в расположении бугров пучения, их приуроченности к увеличению мощности ММП, а также возможные субвертикальные каналы миграции газа;
5. Определить возможное положение скоплений газовых гидратов и газа в свободном состоянии.

Важным представляется тот факт, что изучение данного интервала отложений ВЧР (в диапазоне глубин 10 – 500 м) сейсморазведкой в ее глубинной модификации (ориентированной на нефтегазопроисковые задачи) практически невозможно. В свою очередь, полученную геологическую информацию о структуре многолетнемерзлых пород возможно использовать для повышения качества обработки сейсморазведочных данных.



▲ Рис. 12. Результаты интерпретации мЗСБ (Западная Сибирь):
А – куб удельного электрического сопротивления ВЧР участка исследований,
Б – рельеф подошвы современного слоя ММП.

Использование результатов мЗСБ для обработки данных сейсморазведки

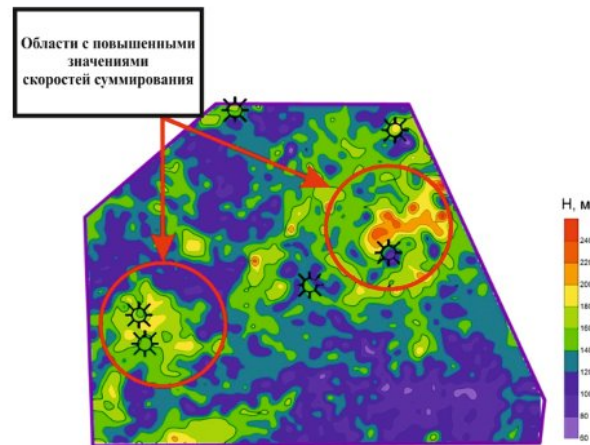
При интерпретации материалов сейсморазведочных работ на территориях, где развиты ММП, необходимо учитывать их влияние на материалы сейсморазведки. Источником такого влияния выступают скоростные аномалии, сосредоточенные в относительно тонком, но неоднородном по толщине приповерхностном интервале залегания слоёв многолетнемерзлых пород. Недоучёт влияния ММП на форму отражающих горизонтов может привести к значительным ошибкам в структурных построениях.

Поправки за влияние локальных изменений свойств ММП определяются заменой слоя после проведения детального скоростного анализа. Значения скоростей для расчёта поправок за ММП снимаются по траектории прослеживания горизонтов, связанных с мерзлотой или по условному уровню ниже ММП. При сопоставлении карт мощности многолетнемерзлых пород по данным ЗСБ и скоростей суммирования ОГТ (Рис. 13) видно, что зоны повышенных скоростей суммирования отождествляются с областями увеличения мощности ММП.

Использование границы подошвы мерзлоты, определенной по данным ЗСБ, в процессе пикировки горизонта ММП на сейсмических данных может повысить точность определения скоростей суммирования и, как следствие, повысить точность структурных построений.

Решение геоэкологических задач методом мЗСБ

Стоит отметить, что метод мЗСБ показал свою высокую эффективность при экологическом мониторинге на месторождениях углеводородов [15]. Так, после бурения скважины на одном из месторождений Восточной Сибири был полу-



▲ Рис. 13. Карта мощности ММП по данным мЗСБ. Условные обозначения: 1 – изолинии мощности ММП, м; 2 – бугры пучения; 3 – области повышенных значений скоростей суммирования.

чен приток нефти. Спустя некоторое время в населенном пункте вблизи месторождения наблюдались выходы нефти на поверхность.

Основными задачами при проведении работ мЗСБ являлись: оценка пространственного распространения вторичной залежи углеводородов; определение глубины залегания загрязненных пластов; выделение наиболее проницаемых зон миграции углеводородов из основной залежи во вторичную. Была сформирована физико-геологическая модель проникновения, распространения и накопления углеводородов в верхней части разреза осадочного чехла. Под действием аномально высоких пластовых давлений углеводородные флюиды проникают по системе разломов и трещин из разгерметизированных глубокозалегающих залежей осинского горизонта в верхние проницаемые водоносные горизонты. Прямым следствием этих процессов явилось появление нефтепродуктов в верхоленском водоносном горизонте.

В результате проведенных работ ЗСБ в породах средне-верхнего кембрия был выделен горизонт пониженного сопротивления, в состав которого, вероятно,

входят пласты-коллекторы, содержащие углеводородные флюиды. Каналом для проникновения растворов в приповерхностные грунтовые воды служат неотектонические зоны трещиноватости, отмеченные на геоэлектрических разрезах (Рис. 14). Характерные для этих зон пониженные значения сопротивления присущи как плотным породам верхоленской свиты, так и четвертичным отложениям. Таким образом, углеводороды проникают в приповерхностное пространство именно в составе растворов.

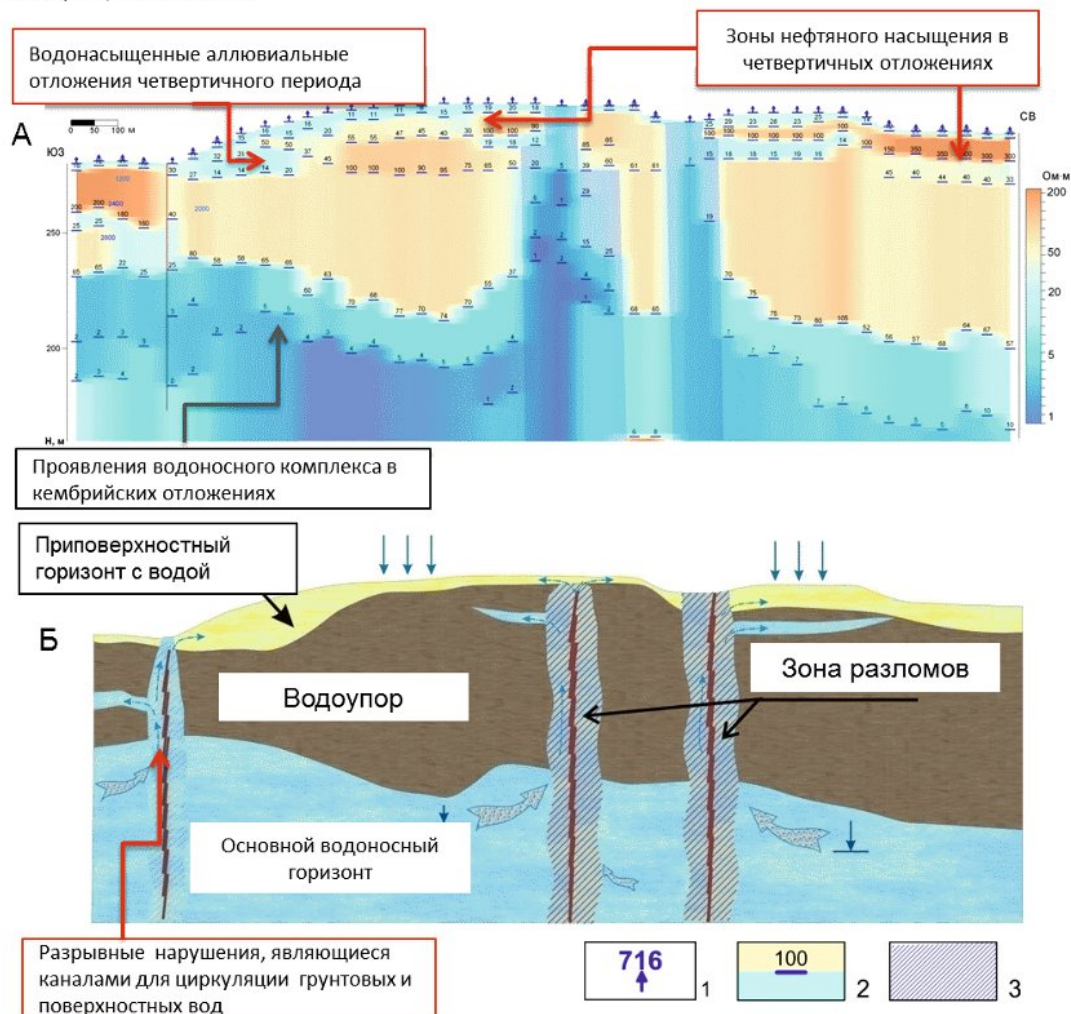
Из результатов работ мЗСБ следует, что положение нефтенасыщенных пластов связано с распространением высокоом-

ного подгоризонта. Зоны вероятного нефтяного насыщения горизонтов, выделенные по данным ЗСБ, подтверждены результатами испытания наблюдательно-эксплуатационных скважин. Применение малоглубинных электроразведочных работ ЗСБ позволило оконтурить высокоомные зоны в верхней части разреза, которые относятся к зонам УВ-загрязнения.

Заключение

Возможности современных цифровых программно-измерительных комплексов, таких как FastSnap, позволяют расширить возможности малоглубинного ЗСБ и вывести решение задач по изучению

▼ Рис. 14. Результаты исследований мЗСБ: А – Геоэлектрический разрез через площадь исследования; Б – схематический геологический разрез, построенный по данным мЗСБ. Условные обозначения: 1 – пункты мЗСБ; 2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивления, Ом·м; 3 – зоны трещиноватости.



геоэлектрических свойств разреза на качественно новый уровень. Высокочастотный измерительный канал с широкой полосой пропускания и высокой чувствительностью позволяет увеличить интервал измеряемых глубин, во-первых, за счет снижения стартовой глубины зондирования, и, во-вторых, обеспечить повышенную глубинность благодаря уверенной регистрации слабых сигналов на поздних временах становления. Возможность одновременного применения нескольких телеметрических каналов позволяет организовать многоканальные системы наблюдений, обладающие большей информативностью и производительностью. Надежность и технологичность оборудования дает возможность достичь высокой производительности работ (до 15-20 трехканальных установок с генераторной петлей 100 × 100 м в день на одну полевую бригаду).

Результаты малоглубинных ЗСБ, полученные в совершенно разных природно-климатических условиях и геологических сценариях, подтверждают эффективность метода при решении широкого круга задач ВЧР. Значительная глубинность метода (более 500 м) позволяет: определять глубину залегания водоносных горизонтов; решать задачи структурного картирования; изучения мерзлых пород, трапповых и туфовых тел; экологического мониторинга и т.д. Важно, что результаты исследований мЗСБ подтверждаются последующим бурением, что позволяет реально оценивать широкие возможности метода.

Список литературы

1. Бучарский Б. В., Горячев В. В., Павлов А. Т., 1986, Развитие малоглубинной модификации электроразведки ЗСБ: Изв. вузов. Геология и разведка, 8, 74 – 79
2. Плотников А.Е., Кожевников Н.О.

Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза // Геофизика. 2004. № 6.

3. Ю.А. Агафонов, В.В. Гомульский, М.В. Шарлов, О.В. Токарева, И.А. Тарасов, И.В. Буддо. Применение метода малоглубинных ЗСБ при изучении ВЧР в Восточной Сибири. Инженерная геофизика 2013 — Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2013 г.С. 33-38.

4. H. Shaaban, G. El-Qady, E. Al-Sayed, H. Ghazala, A.I. Taha Shallow groundwater investigation using time-domain electromagnetic (TEM) method at Itay El-Baroud, Nile Delta, Egypt. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics (2016) 5, 323–333

5. Gaetano Ranieri, Tigistu Haile and Tamiru Alemayehu TEM-Fast Small-Loop Soundings to Map Underground Tunnels and Galleries Connecting the Rock-Hewn Churches of Lalibela, Ethiopia. Geomorphology: An International Journal, Vol. 20, No. 5, 433–448 (2005)

6. Мандельбаум М.М. и др. Геофизические методы обнаружения нефтегазовых залежей на Сибирской платформе / Мандельбаум М.М., Б.И.Рабинович, В.С.Сурков. – М: Недра, 1983.

7. Корольков Ю.С., Зондирование становлением электромагнитного поля для поиска нефти и газа. М.: Недра, 1987, 117 с.

8. McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques. – Missisagua, Canada: Geonics Limited. - TN 7, 1980. - 17 p.

9. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. №01(31). С. 27 – 31.

10. Электронный ресурс сети интернет: www.fastsnap.ru

11. М.В. Шарлов Интегрированный подход к обработке и инверсии данных малоглубинных ЗСБ – оценка эффективности по результатам математического моделирования // Расширенные тезисы 13-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика 2017».

12. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Суров Л.В., Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, №1, С.33 – 36.

13. Yuri Agafonov, Aleksandra Aksenovskaya, Ilya Egorov, Dmitri Kolesnikov, Maxim Sharlov, High-density shallow TEM surveys for groundwater prospecting in East Siberia. 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Chiang Mai, Thailand. 2016.

14. Шелохов И.А., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В. Агафонов Ю.А Опыт применения малоглубинных электромагнитных зондирований для изучения криолитозоны. Инженерная геофизика – 2017. Кисловодск. 2017.

15. Гомульский В.В, Марковцева О.В, Агафонов Ю.А, Егоров И.В. Применение малоглубинных электромагнитных зондирований при изучении техногенных залежей углеводородов. GeoBaikal 2010. Иркутск. 2010.

Подробнее об авторах



Шарлов
Максим Валерьевич

первый заместитель
генерального директора
АО «Иркутское электрораз-
ведочное предприятие»



Буддо
Игорь Владимирович
кандидат геолого-минера-
логических наук, замести-
тель главного геофизика
АО «Иркутское электрораз-
ведочное предприятие»,
Институт земной коры
СО РАН



Шелохов
Иван Антонович

геофизик АО «Иркутское
электроразведочное
предприятие»



Мисюркеева
Наталья Викторовна

ведущий геолог
АО «Иркутское электро-
разведочное
предприятие»



Агафонов
Юрий Александрович

к.т.н., генеральный
директор АО «Иркутское
электроразведочное
предприятие»